

基于物元可拓模型和 ARIMA 模型的生态城市建设评价研究¹

柳映潇¹, 王 衡^{1, 2}

(1. 贵州财经大学 西部现代化研究中心, 贵州 贵阳 550025;

2. 中国西部减贫与发展协同创新中心, 贵州 贵阳 550025)

【摘要】: 生态城市建设是一个长期复杂的系统工程, 为把握生态城市建设现状、预测发展趋势, 需要对生态城市建设展开系统评价。以贵阳市为研究区域, 旨在了解贵阳生态城市建设状况, 有利于推进贵阳 2020 年建成全国生态文明示范城市, 以期为全国生态文明建设发挥示范作用。文章从环境、经济、社会角度构建贵阳市生态城市建设评价指标, 利用物元可拓模型和 ARIMA 模型对贵阳市生态城市建设现状进行测度, 并预测贵阳市 2020 年生态城市建设水平, 根据评价及预测结果对贵阳市未来生态城市建设规划管理提出相应对策。

【关键词】: 生态城市建设; 评价指标体系; 物元可拓模型; ARIMA 模型; 贵阳市

【中图分类号】: X196 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1671-4407 (2018) 07-154-08

1、引言

在我国当下快速的城市化与城镇化进程中, 城市与城镇人口迅速增加, 引发了严重的城市环境问题, 社会关注的焦点也逐渐转向城市生态环境, 因此, 实现生态环境与城市经济社会协调发展, 已成为当前面临的巨大挑战。生态城市的核心理念就是让城市的生态系统和经济系统形成有机统一, 在城市建设过程中解决“危机”与“发展”问题。由此, 生态城市建设成为城市转型发展的方向与主题, 生态城市建设的评价问题也随之产生。

关于生态城市评价的研究, 首先涉及评价指标体系的构建。1999 年宋永昌和戚仁海^[1]提出从三个维度建立生态城市的指标体系和评价方法: 城市生态系统内部结构、协调性和作用。而 Joss^[2]也考虑了三个方面: 指标的尺度、指标所在领域、指标进行中所得到的政策支持。2005 年周海燕和周国华^[3]提出生态城市的测试指标评价体系是从生态经济、生态景观、生态卫生、生态安全和生态意识五个方面着眼。2010 年吴颖婕^[4]在分析了生态城市理论和内涵的基础上, 从社会、经济和自然三个方面分析城市复合发展系统, 并以扬州为例构建评价指标。1995 年联合国发展委员会从经济、社会、环境和制度四个方面, 依据《21 世纪议程》构建了可持续发展指标体系^[5]。Scerri & James^[6]指出生态城市指标的制订要考虑社会科学方面提到的影响因素, 要体现生态城市的建设价值。

¹**【基金项目】**: 贵州财经大学与商务部国际贸易经济合作研究院联合基金项目“‘两江上游’精准扶贫脱贫研究”(2016SWBZD19)

【第一作者简介】: 柳映潇 (1992-), 女, 山东淄博人, 硕士生, 研究方向为城市规划和建设管理。E-mail: 361179647@qq.com

【通讯作者简介】: 王衡 (1985-), 女, 贵州遵义人, 博士, 副教授, 研究方向为环境规划和环境治理。E-mail: 2362107771@qq.com

在生态城市的评价方法方面，主要分为定性分析法与定量分析法。定性分析法是对已有文献的分析、总结；定量分析是通过数据分析来描述所评价事物的发展状况。生态城市评价的定量分析通常有以下几种，20 世纪 90 年代 Wackemagel 等^[7]提出的生态足迹法，用其测度生态可持续发展状况；吴琮等^[8]从经济、社会、自然三个方面构建评价指标体系，并提出全排列多边形图示指标评价方法；周振民等^[9]通过因子分析法对生态系统进行评价；物元可拓模型是由蔡文^[10]提出的一门贯穿自然和社会的系统科学，通过此模型得到的评价方法，将各评价指标转化为一种相容的问题。

贵阳市具有独特的地形地貌、丰富的自然资源、适宜的气候条件等良好的绿色生态优势。同时，贵阳市处于西部欠发达地区，生态相对脆弱，所以建设生态城市是贵阳的必然选择。作为全国首个生态文明示范城市，贵阳市政府高度重视绿色发展和环境保护，经过多年发展，贵阳生态城市建设取得一定成效，先后获得“国家园林城市”“全国绿化模范城市”“中国人居环境范例城市”等称号。目前对贵阳生态城市建设的研究有很多，但在生态城市建设评价方面，还未有根据生态城市分级考核标准、理想发展目标等对生态城市建设进行动态评价及预测。为了让人们更深切地体会到维持城市生态平衡的重要性，更确切地把握生态城市建设现状，提高生态城市建设水平以及合理预测发展趋势，本文引入物元可拓模型对贵阳生态城市建设水平进行动态评价，利用指标的经典域区间及单个指标的关联函数，得到多指标的综合水平，保证评价的准确性。依据 ARIMA 模型预测发展趋势，继而从社会生态、经济生态、自然生态方面提出贵阳生态城市建设对策，为贵阳生态城市建设提供科学依据。

2、模型与方法

2.1 物元可拓模增

物元可拓法是可拓性的定性分析与关联函数的定量计算相结合的研究方法，通过构建物元可拓模型能够得出与实际相符的结论^[10]。根据物元可拓分析构建的贵阳市生态城市建设评价的步骤：首先建立贵阳生态城市建设评价的经典域、节域、待评物元矩阵并将其规格化；其次计算各指标的关联度；最后计算贵阳市生态城市建设各等级的关联度，以定量结果反映生态城市建设的确切水平和等级。

2.1.1 经典域的确定

将所评价的生态环境建设等级记作 P_{oj} ，其特征 C_n 与量值 X_{ojn} 所组合的 $R_{oj} = (P_{oj}, C_n, X_{ojn})$ 为生态城市建设等级的物元， P_{oj} 有 n 个特征，则 P_{oj} 称为 n 维物元，也叫作经典域，见公式（1）：

$$R_{oj} = (P_{oj}, C, X_{oj}) = \begin{bmatrix} P_{oj} & C_1 & X_{oj1} \\ & C_2 & X_{oj2} \\ & \dots & \dots \\ & C_n & X_{ojn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{oj} & C_1 & \langle a_{oj1}, b_{oj1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{oj2}, b_{oj2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & C_n & \langle a_{ojn}, b_{ojn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

将经典域的量值两端除以节域右端的值得到规格化的经典域 R' 。

2.1.2 确定评价等级的节域物元

根据所有等级所对应的数值范围，确定评价等级的节域物元见公式（2）：

$$R_p = (P, C, X_p) = \begin{bmatrix} P & C_1 & X_{p1} \\ & C_2 & X_{p2} \\ & \dots & \dots \\ & C_n & X_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中：P 为生态环境质量评价标准； X_{pm} 为 P 关于指标 C_n 所取的量值范围。

2.1.3 确定待评物元

根据评价生态城市建设等级相关的数据确定的待评物元见公式（3）：

$$R_0 = (P_0, C, X) = \begin{bmatrix} P_0 & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & C_3 & \langle a_{p3}, b_{p3} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中： P_0 指生态环境质量； X_n 为 P_0 关于评价指标 C_n 的实际值。将待评物元矩阵中两端值同时除以节域右端的值得到规格化的待评物元矩阵 R'_0 。

2.1.4 确定关联函数

评价指标与某等级之间的隶属程度所构成的函数为关联函数见公式（4）：

$$d_{kij}(x_{ki}) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_{ki}, x_{ojj})}{|x_{ojj}|} & x_{ki} \in x_{ojj} \\ \frac{\rho(x_{ki}, x_{oji})}{\rho(x_{ki}, x_{pi}) - \rho(x_{ki}, x_{oji})} & x_{ki} \notin x_{oji} \end{cases} \quad (4)$$

其中： $x_{ojj} = \langle a_{oji}, b_{oji} \rangle$ 的模，即：

$$|x_{ojj}| = |b_{oji} - a_{oji}| \quad (5)$$

x_i 到 x_{oji} 的距离为：

$$\rho(x_{ki}, x_{oji}) = \left| x_{ki} - \frac{1}{2}(a_{oji} + b_{oji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{oji} - a_{oji}) \quad (6)$$

x_{ki} 到 x_{pi} 的距离为：

$$\rho(x_{ki}, x_{pi}) = \left| x_{ki} - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (7)$$

当 $d_{ki}(x_{ki}) < -1$ 时，表示指标不符合标准，也不具备转化为符合标准要求的条件； $-1 \leq d_{ki}(x_{ki}) \leq 0$ 表示指标不符合标准，具备转化为符合标准要求的条件； $0 \leq d_{ki}(x_{ki}) \leq 1$ 表示指标符合标准，值越大越接近标准要求； $d_{ki}(x_{ki}) > 1$ 表示指标超过标准要求，值越大效果越好^[11]。

2.1.5 综合关联度的计算

指标 C_i 对应的权系数为 a_i ，综合关联度 $K_j(P_o)$ 计算公式为：

$$K_j(P_o) = \sum_{i=1}^n a_i k_{ij}(x_i) \quad (8)$$

2.1.6 等级评定指标的确定

若 $K_{j_0} = \max K_j(P_o)$ ， $j=1, 2, \dots, m$ ，则 P_o 属于等级 j_0 ，对所有 j ， $K_j(R_o) \leq 0$ 表示 P_o 不属于所划分的等级内，应舍去。

2.2 ARIMA 模型

ARIMA 模型称作自回归移动平均模型，是一种时间序列的动态统计方法，包含了 AR 自回归模型和 MA 移动模型。MA 模型具有短期预测性，可以根据过去值与现在值预测未来制，因此 ARIMA 模型具有对时间序列的短期预测性^[12]。建立模型的步骤为：首先检验序列是否趋于平稳；其次对模型的参数进行估计；最后检验模型^[13]。

2.3 物元可拓—ARIMA 组合模型

物元可拓—ARIMA 组合模型，既包括对评价对象所处水平的测度模型，又包括时间序列的预测模型，两个模型组合在一起意在能够发挥其各自的作用。根据现有数据对目前生态城市建设水平做出评价，并对未来生态城市建设水平相关指标的情况做出预测，进而预测未来生态城市建设水平。

3、贵阳市生态城市建设评估实证

3.1 研究区概况

贵阳市位于东经 $106^{\circ} 07' \sim 107^{\circ} 17'$ ，北纬 $26^{\circ} 11' \sim 27^{\circ} 22'$ 在贵州省中部，市中心平均海拔 1000 米，土地总面积 8034 平方千米，建成区面积 162 平方千米。贵阳市属于亚热带湿润温和型气候，温度适宜、雨量充沛，具有“中国避暑之都”的美誉。湿润温和的气候使得贵阳生物资源种类繁多、森林资源丰富，是全国少有的“森林之城”，并拥有以喀斯特地貌为特点的自然景观和人文旅游资源。2007 年贵阳市决定建设生态文明城市，通过了《关于建设生态文明城市的决定》^[14]。2012 年通过的《贵阳建设全国生态文明示范城市规划（2012-2020 年）》使贵阳成为首个以生态文明建设为核心进行城市规划的城市，也成为首个全国生态文明示范城市。2017 年又提出以实际行动全力推进大生态战略贵阳行动，把建设生态城市作为城市建设和管理的出发点和落脚点。

3.2 贵阳市生态城市建设评价指标体系

3.2.1 指标体系的构建

生态城市评价指标体系的构建主要涉及以下原则：（1）全面性。从环境、经济、社会的角度，系统全面的选取生态城市的建设评价指标；（2）科学性。从反映生态城市建设现状出发，选择科学的统计指标；（3）可获得性。选取可以得到准确数据的指标，剔除不易获取数据的指标；（4）典型性。根据研究区域的特征，选取具有典型代表性的指标。对现有的文献资料、《贵阳市“十三五”生态文明建设专项规划》等政府规划中所涉及的生态城市评价指标内容搜集，整理使用频率高的指标作为借鉴，选择反映生态城市内涵特征的指标，然后以环境—经济—社会分类尽可能选用少的有代表性的指标，科学正确的反映城市未来

发展水平^[15]，构建贵阳市生态城市评价指标体系如表 1 所示。

表 1 贵阳市生态城市评价指标体系

目标层	准则层	状态层	指标层	计量单位	指标类型
生态城市建设	生态环境	环境质量	C ₁ : SO ₂ 年平均浓度	微克/立方米	逆指标
			C ₂ : PM ₁₀ 年平均浓度	微克/立方米	逆指标
			C ₃ : COD 排放量	万吨	逆指标
			C ₄ : 地表水水质达标率	%	正指标
			C ₅ : 饮用水水源达标率	%	正指标
			C ₆ : 空气质量优良率	%	正指标
			C ₇ : 城市生活垃圾无害化处理率	%	正指标
		生态保育	C ₈ : 工业固体废物处置利用率	%	正指标
			C ₉ : 森林覆盖率	%	正指标
			C ₁₀ : 建城区绿化覆盖率	%	正指标
	生态社会	人民生活	C ₁₁ : 城镇化率	%	正指标
			C ₁₂ : 城市人口密度	人/平方千米	逆指标
			C ₁₃ : 人均公共绿地面积	平方米/人	正指标
		基础设施	C ₁₄ : 万人拥有公交车辆	辆/万人	正指标
			C ₁₅ : 人均城市道路面积	平方米/人	正指标
			C ₁₆ : 万人拥有医院床位数	张/万人	正指标
			C ₁₇ : 绿色出行	万人次/万人	正指标
	生态经济	发展水平	C ₁₈ : 人均 GDP	元/人	正指标
			C ₁₉ : 城镇居民人均可支配收入	元	正指标
			C ₂₀ : R&D 经费支出占 GDP 比重	%	正指标
		经济结构	C ₂₁ : 第三产业占 GDP 比重	%	正指标
			C ₂₂ : 万元 GDP 能耗	吨标煤/万元	逆指标

3. 2. 2 评价标准的确定

国际上对生态城市建设水平还没有统一的评价标准，所以本文在对生态城市建设水平的标准进行设定时，参考了《国家生态园林城市分级考核标准》《中国人居环境奖评奖标准》。一方面要考虑贵阳市客观条件及已确定的理想发展目标，另一方面参考相关文献^[4, 16]。将生态城市发展水平分为优、良、合格、较差 4 个等级，具体的划分标准如表 2 所示。

表 2 生态城市评价指标等级

评价指标	评价等级			
	优秀	良好	合格	较差
C ₁	0~20	20~40	40~60	60~80
C ₂	0~35	35~50	50~70	70~80
C ₃	0~2	2~3	3~5	5~6

C ₄	95~100	90~95	85~90	80~85
C ₅	97~100	95~97	90~95	85~90
C ₆	90~100	85~90	80~85	75~80
C ₇	95~100	90~95	85~90	80~85
C ₈	95~100	90~95	85~90	80~85
C ₉	80~100	60~80	40~60	20~40
C ₁₀	45~50	40~45	35~40	30~35
C ₁₁	75~80	65~75	55~65	45~55
C ₁₂	8000~10000	10000~12000	12000~16000	16000~20000
C ₁₃	20~25	16~20	8~16	0~8
C ₁₄	12~16	10~12	8~10	6~8
C ₁₅	15~18	10~15	5~10	0~5
C ₁₆	60~80	40~60	30~40	20~30
C ₁₇	150~165	130~150	100~130	50~100
C ₁₈	150000~200000	100000~150000	50000~100000	0~50000
C ₁₉	35000~40000	30000~35000	25000~30000	20000~25000
C ₂₀	2~3.5	1.5~2	1~1.5	0~1
C ₂₁	70~90	60~75	45~60	25~40
C ₂₂	0~0.5	0.5~0.8	0.8~1	1~1.2

3.3 数据描述性统计

本文研究所用数据来源于 2001-2015 年的《贵阳统计年鉴》和《贵阳市环境状况公报》。根据上述指标体系，贵阳市相关数据描述性统计如表 3 所示。

表 3 样本数据描述性统计

指标	极小值	极大值	均值	标准差
C ₁	17.00	107.00	60.00	27.33
C ₂	61.00	106.00	82.07	11.30
C ₃	3.90	5.79	4.99	0.54
C ₄	94.40	95.83	95.36	0.68
C ₅	96.14	100.00	99.49	1.15
C ₆	76.16	96.20	92.34	5.20
C ₇	45.90	97.30	85.30	16.43
C ₈	74.69	99.54	91.67	8.05
C ₉	34.77	46.50	40.30	4.43
C ₁₀	38.60	43.50	41.76	1.27
C ₁₁	0.62	73.25	45.53	33.05
C ₁₂	4760.00	10233.00	6034.92	1621.28
C ₁₃	8.31	12.86	10.50	1.29

C ₁₄	6.16	12.37	9.28	2.20
C ₁₅	3.50	12.00	6.01	2.49
C ₁₆	40.81	70.10	51.95	11.03
C ₁₇	52.64	159.19	87.87	38.12
C ₁₈	9948.00	63003.00	27095.67	16559.49
C ₁₉	7306.00	27241.00	15445.47	6489.85
C ₂₀	0.55	1.01	0.73	0.13
C ₂₁	41.20	57.20	49.83	5.83
C ₂₂	1.19	3.67	1.96	0.81

3.4 2011-2015 年贵阳市实证分析结果

3.4.1 经典域、节域和待评物元矩阵构造

构建四个等级的经典域矩阵如下：

$$R = \begin{bmatrix} P & C & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ C_1 & (0,20) & (20,40) & (30,50) & (60,80) \\ C_2 & (0,40) & (40,50) & (50,70) & (70,90) \\ C_3 & (0,2) & (2,3) & (3,5) & (5,6) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{22} & (0,0.5) & (0.5,0.8) & (0.8,1) & (1,1.2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

上述矩阵进行规格化得到新矩阵：

$$R' = \begin{bmatrix} P & C & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ C_1 & (0,0.25) & (0.25,0.5) & (0.375,0.625) & (0.75,1) \\ C_2 & (0,0.445) & (0.445,0.556) & (0.556,0.778) & (0.778,1) \\ C_3 & (0,0.333) & (0.333,0.5) & (0.5,0.833) & (0.833,1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{22} & (0,0.417) & (0.417,0.667) & (0.667,0.833) & (0.833,1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

构建节域矩阵如下：

$$R_{(P)} = \begin{bmatrix} P & C_1 & (0,80) \\ & C_2 & (0,90) \\ & C_3 & (0,6) \\ & \dots & \dots \\ & C_{22} & (0,1.2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.4.2 待评物元矩阵

选定 2015 年为评价对象，构建待评物元矩阵及规格化后待评物元矩阵 $R_{(2015)}$ 及规格化后待评物元矩阵 $R'_{(2015)}$ ：

$$R_{(2015)} = \begin{bmatrix} P_{(2015)} & C_1 & 17 \\ & C_2 & 61 \\ & C_3 & 3.904 \\ & \cdots & \cdots \\ & C_{22} & 1.189 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R'_{(2015)} = \begin{bmatrix} P_{(2015)} & C_1 & 0.2125 \\ & C_2 & 0.763 \\ & C_3 & 0.651 \\ & \cdots & \cdots \\ & C_{22} & 0.991 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.4.3 指标关联度、权重、综合关联度

根据上文计算公式（4），计算出评价等级的距 D_{ij} ：

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} -0.038 & 0.038 & 0.288 & 0.538 \\ 0.263 & 0.207 & -0.015 & 0.015 \\ 0.167 & 0.067 & -0.067 & 0.183 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0.491 & 0.324 & 0.158 & -0.009 \end{bmatrix} \quad (14)$$

依据熵权法对各指标权重进行计算，得到贵阳市生态城市建设评价指标体系各指标权重见表 4。

表 4 各评价指标权重

指标	权重	指标	权重
C ₁	0.075	C ₁₂	0.015
C ₂	0.021	C ₁₃	0.025
C ₃	0.035	C ₁₄	0.040
C ₄	0.213	C ₁₅	0.050
C ₅	0.012	C ₁₆	0.055
C ₆	0.011	C ₁₇	0.120
C ₇	0.028	C ₁₈	0.058
C ₈	0.019	C ₁₉	0.044
C ₉	0.060	C ₂₀	0.034
C ₁₀	0.015	C ₂₁	0.037
C ₁₁	0.061	C ₂₂	0.019

由上述计算公式可以得出 2015 年等级的综合关联度，同理计算 2011-2014 年的综合关联度。汇总 2011-2015 年综合关联度见表 5。

表 5 2011-2015 年综合关联度

年份	优	良	合格	差
2015	0.860	0.936	0.969	0.819
2014	0.850	0.944	0.896	0.833
2013	0.845	0.923	0.942	0.831
2012	0.840	0.919	0.942	0.848
2011	0.837	0.837	0.945	0.864

3.5 2020 年贵阳市生态城中建设预测

3.5.1 预测模型分析

(1) 序列平稳化处理。以人均 GDP 为例，由图 1 的时序图可以看出，随时间变化人均 GDP 有明显的上升趋势，并非平稳序列。图 2 表示的是对原始数据进行二次差分后函数大部分处在置信区间范围内，可认为该序列平稳。经过二阶差分变化后人均 GDP 所选定的模型为 ARIMA (1, 2, 1)，对其进行拟合和预测。

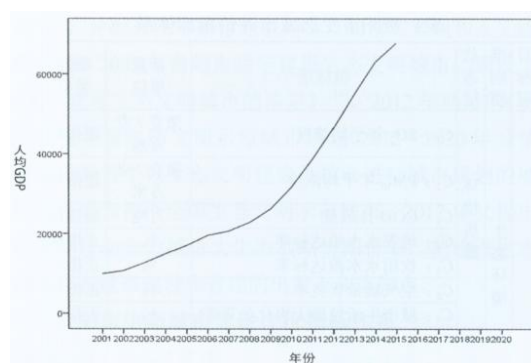


图 1 时序图（单位：元/人）

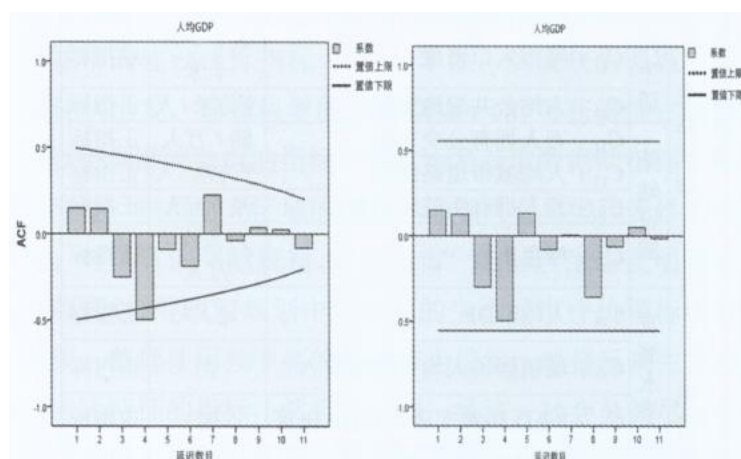


图 2 二次差分的 ACF 与 PACF

(2) 模型分析。通过软件对确定的模型设置，分析模型结果。模型，为 0.997，图 3 显示的残差 ACF 和 PACF 都是平稳的，说明模型较为合理。图 4 表明拟合效果较好。2016 年到 2020 年的预测值如表 6，其中 2020 年的预测值为 115229.17 元/人。

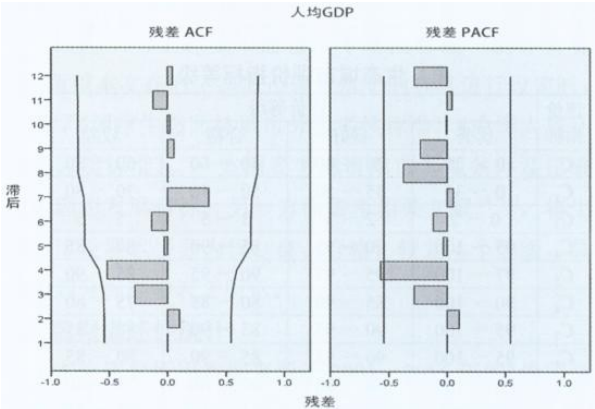


图 3 残差 ACF 与 PACF

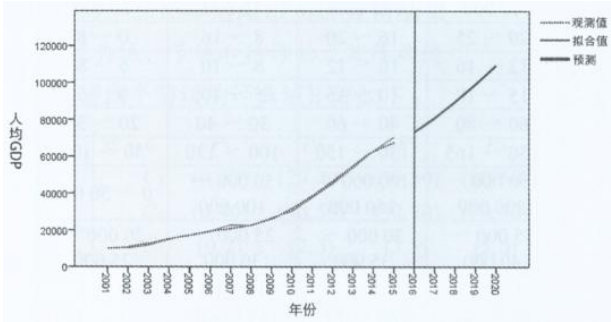


图 4 人均 GDP 拟合效果图（单位：元/人）

表 6 2020 年人均 GDP 预测值（单位：元/人）

年份	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
预测值	71655.77	81146.01	91541.07	102887.84	115229.2

(3) ARIMA 模型预测结果。文章用类似的方法将贵阳市生态城市评价指标体系中其余指标分别进行了 ARIMA 模型预测，并得到 2020 年各项指标的预测值见表 7。

表 7 2020 年贵阳市生态城市评价指标预测值

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁
预测值	2.7	37.81	2.25	95.74	99.72	86.4	90.69	100	52.99	33.83	79.85
指标	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂
预测值	16997	19.15	18.78	6.58	73.31	200.14	115229	39523	0.95	64.53	0.5

3.5.2 贵阳市 2020 年生态城市建设评价

根据上述预测结果,对贵阳市 2020 年生态城市建设进行评估,构建待评物元矩阵 $R_{(2020)}^T$ 及规格化后待评物元矩阵 $R'_{(2020)}^T$, 计算出贵阳市 2020 年综合关联度见表 8。

表 8 综合关联度

综合关联度	优	良	合格	差
2020 年	0.889	0.89	0.819	0.663

$$R_{(2020)}^T = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ 2.7 & 37.81 & 2.25 & 95.74 & 99.72 & 86.4 \\ C_7 & C_8 & C_9 & C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ 90.69 & 100 & 52.99 & 33.83 & 79.85 & 16997 \\ C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} & C_{17} & C_{18} \\ 19.15 & 18.78 & 6.58 & 73.31 & 200.14 & 115229 \\ C_{19} & C_{20} & C_{21} & C_{22} \\ 39523 & 0.95 & 64.53 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R'_{(2020)}^T = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ 0.03 & 0.47 & 0.38 & 0.96 & 1 & 0.86 & 0.91 & 1 \\ C_9 & C_{10} & C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ 0.53 & 0.68 & 1 & 0.85 & 0.77 & 1.57 & 0.37 & 0.82 \\ C_{17} & C_{18} & C_{19} & C_{20} & C_{21} & C_{22} \\ 1.21 & 0.58 & 0.99 & 0.27 & 0.81 & 0.42 \end{bmatrix} \quad (16)$$

计算评价等级距如下:

$$D_{ij}^T = \begin{bmatrix} -0.03 & 0.03 & 0.04 & -0.007 & -0.003 & 0.04 \\ 0.22 & -0.03 & -0.04 & 0.007 & 0.03 & -0.01 \\ 0.47 & 0.14 & 0.13 & 0.06 & 0.05 & 0.02 \\ 0.72 & 0.36 & 0.46 & 0.11 & 0.1 & -0.02 \\ 0.04 & 0 & 0.27 & 0.22 & -0.002 & 0.35 \\ -0.01 & 0.05 & 0.07 & 0.12 & 0.06 & 0.25 \\ 0.01 & 0.1 & -0.07 & 0.02 & 0.13 & 0.05 \\ 0.06 & 0.15 & -0.03 & -0.02 & 0.45 & -0.05 \\ 0.03 & 0.57 & 0.47 & 0.02 & 0.21 & 0.16 \\ -0.03 & 0.82 & 0.19 & -0.02 & 0.3 & -0.09 \\ 0.13 & 0.94 & -0.09 & 0.15 & 0.43 & 0.09 \\ 0.45 & 1.07 & 0.09 & 0.37 & 0.61 & 0.39 \\ -0.01 & 0.06 & 0.09 & -0.0003 \\ 0.11 & 0.16 & -0.09 & 0.0003 \\ 0.24 & 0.01 & 0.11 & 0.25 \\ 0.36 & -0.01 & 0.31 & 0.42 \end{bmatrix} \quad (17)$$

4、结论与启示

贵阳市 2011-2015 年的综合关联度分别为：0.945、0.942、0.942、0.944、0.969，由此确定贵阳市 2011-2013 年和 2015 年生态城市建设水平为合格，2014 年达到良好等级。贵阳市基本达到了生态城市建设的标准和要求，但距离优秀等级还有一定的差距。根据贵阳市 2001-2015 年各评价指标的变化趋势，利用 ARIMA 模型对贵阳市 2020 年各指标进行预测，从生态城市建设的评价结果分析来看，2020 年贵阳生态城市建设仍难以达到优秀等级。因此，需要在经济、环境、社会等方面进一步提升，从而促进贵阳市 2020 年建成全国生态文明示范城市。

4.1 经济发展方面

2015 年贵阳市人均 GDP 水平、城镇居民可支配收入处在合格等级，预测 2020 年达到良好、优秀等级。R&D 经费占 GDP 比重、第三产业所占比重、万元 GDP 能耗在 2015 年均处于较差的水平，到 2020 年后两者可达到良好、优秀等级，而 R&D 经费占 GDP 比重仍处在较差的等级。说明贵阳市经济发展有较大的发展潜力，同时科技创新能力较差，产业结构仍存在相对不合理的问题。

4.1.1 增强科技创新能力

增加 R&D 经费占 GDP 比重，提高科技发展水平，通过科技创新发展新兴产业，促进产业结构优化升级。通过科技创新加强能源资源节约，使经济增长由主要依靠增加物质资源消耗向主要依靠科技进步、劳动者素质提高、管理创新转变^[17]。通过科技创新，优化消费结构、提高消费水平，促进经济增长向依靠消费、投资、出口协调拉动转变。

（1）建立 R&D 活动激励机制。政府要发挥引导作用，鼓励企业开展 R&D 活动。完善税收优惠政策，鼓励企业加强自主创新能力，为相应企业提供 R&D 活动的资金支持，以鼓励企业主动开展 R&D 活动，加大企业的研发投入。政府要为企业的研发活动营造良好的外部环境，把“一带一路”作为经济发展契机，引进外资来发展本地的战略性新兴产业，增加对外资对 R&D 活动的投入^[18]。

（2）为开展 R&D 活动提供人才基础。人才是进行科技研发活动的基础，政府要实施人才引进战略，扩大贵阳留学归国人才及多层次技术人才。依托贵阳高教聚集区建设大学科技园，培养科技创新人才，营造科技创新的氛围。

（3）积极开展产学研合作模式。推进企业与高校或科研机构的合作，加强产学研结合，推进高新技术改造，促进传统产业技术升级，改变传统的生产方式，提高贵阳清洁能源、可再生能源利用率，进而降低万元 GDP 能耗。

4.1.2 调整产业结构

建设生态文明要使得第三产业达到较高比重，第二产业排放的废弃物给生态环境造成巨大的压力，而第三产业对生态环境造成的压力较小^[19]。因此，环境规制强度的提高对污染企业产生淘汰的压力，最终驱动产业结构的调整^[20]。贵阳市目前第三产业处于良好的发展水平，要把发展旅游、文化、金融、会展等现代服务业放在首位，继续重点加快发展第三产业。将生态文化与旅游开发相融合，推出生态旅游路线，打造生态旅游产品，发展乡村生态旅游。贵阳市立足于西南大出口的区位优势，通过发展绿色、高效的现代物流体系，可成为贵阳经济发展新的增长点。

4.2 资源环境建设方面

贵阳市 2015 年 PM₁₀ 年平均浓度、COD 排放量、森林覆盖率及建成区绿化覆盖率均处于合格水平，SO₂ 年平均浓度、地表水质达标率、饮用水水源达标率、空气质量优良率、城市垃圾无害化处理率都可达到优秀等级。预测到 2020 年 COD 排放量、城市垃圾无害化处理率处在良好等级，森林覆盖率及建成区绿化覆盖率等级水平将有所下降。

4.2.1 控制 COD 排放量

(1) 明确污染排放量限额。规定排放量的污染限额,既要明确贵阳环境容量资源,又要考虑到贵阳未来的经济发展,以生态文明建设为落脚点,确定较为现实的先定目标并分期实现。相关责任人要进行长效管理机制,严格控制污染排放量。

(2) 加强水质有效监控。对建成区内污染企业要严格的监督,严格控制工业污染物的排放,做好对生活污染源监测及排放控制,提高城市处理污水能力,将废水先进行预处理,达到后再进行对外排放^[21]。

4.2.2 提高生活垃圾无害化处理率

(1) 设置分类垃圾回收点,健全回收利用网络。加强生活垃圾分类回收与再生资源回收的衔接,统筹餐厨垃圾、园林垃圾等无害化处理和利用,加快推进建筑垃圾回收和资源化利用,建设废弃物再生资源回收处理中心。对人口密度相对较大的地域多设置垃圾分类回收收集点。

(2) 完善垃圾处理技术。垃圾处理要遵循减量、再利用、循环的 3R 原则,将不可分离的垃圾制成肥料,整个垃圾处理系统采取自我循环的方式,小型分散化的垃圾处理技术是值得学习和借鉴的。并且政府要对垃圾处理的市政基础环境设施的建设及运用加大投入。贵阳市要建设优级生态城市要严格控制 SO₂、PM₁₀ 等的污染物排放,推进清洁能源工程建设,加强污染源的检测系统建设,开展机动车尾气污染治理工作,提高企业自身控制及处理废气的能力。

4.3 社会发展方面

贵阳市 2015 年社会基础设施建设大都处于良好水平,根据预测结果,贵阳市 2020 年在基础设施建设方面成为生态城市建设的主要制约因素有城市人口密度、人均公共绿地面积、人均道路面积及万人拥有医院床位数。

4.3.1 控制城市人口密度

贵阳市目前城市化进程加快,但城市化水平的高低不是以城市发展的大小作为评判依据的,要考虑建成区面积与人口规模之间相互制约的关系。贵阳市当前同样面临土地闲置及土地利用低效等问题,可从提高城市人口吸纳能力、建设紧凑型城镇等三个方面出发,推进集约型城镇化^[22]。

4.3.2 扩大人均公共绿地面积

加强城市绿化建设,在扩大城市规模,增加人均城市道路面积的同时,不能减少绿化面积,增加道路绿化带,形成点、线、面相结合的立体城市绿化体系^[23]。贵阳市可以根据喀斯特地貌建设具有城市特色的主题公园,千里河滩湿化公园建设,每年建设完善 1~3 个山体公园,建设完善长坡岭、鹿冲关等一批森林公园^[24]。通过规划建绿、见缝插绿等措施方法提高公共绿地面积。

4.3.3 提高人均道路面积

贵阳市的中心城市大多处于山地,这也成为贵阳城市空间扩展的制约性问题,因此要加强中心城市与各城区之间的道路建设,建设快速通道来缓解贵阳城市交通问题,解决城市空间制约性问题。对中心城市的主次干道要规划合理,合理扩大主次干道及支路的建设范围。

4.3.4 提高基层医疗服务水平

医疗服务治疗与效率也是建设生态城市的一项重要指标,对于提高万人拥有的医院床位数来说,首先要提高整个医疗水平,确保医院床位使用率。以大数据平台作为医院医疗卫生服务能力及管理水平的提高的工具。提高万人拥有医院床位数而不是仅增加床位数量,要建立床位标准制度,考虑医护比例。我国还未对各级各类医院制定床位利用情况评价标准^[25],因此要严格控制床位规模,减少不合理床位扩张,逐渐平衡各类医疗机构床位资源^[26]。

[参考文献]:

- [1]宋永昌,戚仁海.生态城市的指标体系与评价方法[J].城市环境与生态城市,1999(5):16-19.
- [2]Joss S.Eco-cities: A global survey2009[J].Sustainable City,2010,129:239-250.
- [3]周海燕,周国华.生态城市的测度方法及案例研究[J].城市发展研究,2005(1):42-45.
- [4]吴颖婕.中国生态城市评价指标体系研究[J].生态经济,2012(12):52-56.
- [5]United Nations .Indicators of sustainable development framework and methodologies[M].New York : United Nations,1996.
- [6]Scerri A, James P.Accounting for sustainability: Combining qualitative and quantitative research in development ‘indicators’ of sustainability[J].International Journal of Social Research Methodology,2010,13(1):41-53.
- [7]Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al.National natural accounting with the ecological footprint concept[J].Ecological Economics,1999,29(3):375-390.
- [8]吴琼,王如松,李宏卿,等.生态城市指标体系与评价方法[J].生态学报,2005(8):2090-2095.
- [9]周振民,乔明叶,邱海涛.郑州市生态城市建设评价[J].人民黄河,2010(5):11-13.
- [10]蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
- [11]汪伦焰,袁杰,李娜,等.基于物元可拓模型的水生态文明城市建设评价——以许昌市为例[J].人民长江,2016(18):18-21.
- [12]常燕军,周向红.基于ARIMA模型的城市网格化管理预测与仿真[J].统计与决策,2016(1):54-57.
- [13]王耕,王嘉丽,苏柏灵.基于ARIMA模型的辽河流域生态足迹动态模拟与预测[J].生态环境学报,2013(4):632-638.
- [14]申振东.建设贵阳市生态文明城市的指标体系与监测方法[J].中国国情国力,2009(5):13-16.
- [15]米玛.西藏拉萨市生态城市建设研究[D].天津:天津大学,2009.
- [16]田华贤.西安生态城市建设路径研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.

-
- [17]田文富. 制度均衡下的绿色发展及其机制创新[J]. 河南社会科学, 2016 (4) : 54-58.
- [18]许大英, 徐江, 田晓琴. 贵州省 R&D 经费投入的效率分析及提升路径研究[J]. 中国科技信息, 2017 (1) : 96-98.
- [19]乔卫芳, 肖春艳. 基于生态足迹模型的河南省生态承载力评价研究[J]. 生态经济, 2013 (2) : 52-54.
- [20]原毅军, 谢荣辉. 环境规制的产业结构调整效应研究——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 中国工业经济, 2014(8): 57-69.
- [21]赖玢洁, 田金平, 刘巍, 等. 中国生态工业园区发展的环境绩效指数构建方法[J]. 生态学报, 2014 (22) : 6745-6755.
- [22]苏红键, 魏后凯. 密度效应、最优城市人口密度与集约型城镇化[J]. 中国工业经济, 2013 (10) : 5-17.
- [23]王涛. 乌鲁木齐市生态城市建设研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- [24]徐元莉. 贵阳市生态文明评价与实施路径研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [25]裴冬梅, 郭启勇, 郑黎强, 等. 我国二、三级综合医院床位使用率现状对比分析[J]. 中国医院, 2016 (1) : 20-22.
- [26]汪雅璇. 基于平均住院日的我国医院资源优化配置研究[D]. 天津: 天津医科大学, 2016.